

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**О. С. МИТРОФАНОВ, А. Ю. ПРОСКУРІН,
А. С. ПОЗНАНСЬКИЙ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з отримання альтернативного палива
для двигунів внутрішнього згоряння**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ ♦ НУК ♦ 2015

УДК 621.431(076)
ББК 31.365я73
М 66

Автори:

О. С. Митрофанов, канд. техн. наук, доц. каф. ДВЗ;
А. Ю. Проскурін, асист. каф. ДВЗ;
А. С. Познанський, асист. каф. теоретичної механіки

Рецензенти:

Б. Г. Тимошевський, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри ДВЗ;
М. Р. Ткач, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри теоретичної механіки

Митрофанов О. С.

М 66 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з отримання альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння / О. С. Митрофанов, А. Ю. Проскурін, А. С. Познанський. – Миколаїв : НУК, 2015. – 33 с.

Наведено схему та опис експериментального стенда з отримання синтез-газу з біоетанолу. Викладено порядок виконання лабораторних робіт й обробки результатів.

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання при вивченні курсів "Палива, мастила та охолоджуючі рідини", "Застосування альтернативних палив у ДВЗ".

УДК 621.431(076)
ББК 31.365я73

Навчальне видання

**МИТРОФАНОВ Олександр Сергійович
ПРОСКУРІН Аркадій Юрійович
ПОЗНАНСЬКИЙ Андрій Станіславович**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з отримання
альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння**

Комп'ютерне верстання *В. Г. Мазанко*

Коректор *М. О. Паненко*

© Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю.,
Познанський А. С., 2015

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2015

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,0. Об'єм даних 1385 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 50. Зам. № 15.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ЗМІСТ

1. Загальні вказівки до проведення лабораторних робіт	4
1.1. Техніка безпеки	4
1.2. Порядок підготовки до робіт	5
1.3. Звітність із лабораторних робіт	6
1.4. Загальні вказівки до виконання графіків	6
2. Опис експериментальної установки	8
3. Запуск та обслуговування установки	13
4. Зупинка установки	14
5. Лабораторна робота № 1. Визначення теплових втрат термохімічного реактора конверсії	15
5.1. Порядок проведення визначення теплових втрат	15
5.2. Визначення основних параметрів та побудова за- лежностей	16
6. Лабораторна робота № 2. Визначення параметрів термо- хімічного реактора конверсії біоетанолу при отриманні синтез- газу	19
6.1. Порядок проведення	19
6.2. Визначення основних параметрів та побудова за- лежностей	20
7. Визначення похибки основних параметрів	25
7.1. Похибка визначення витрати за допомогою ви- тратомірної шайби	25
7.2. Похибка визначення температури	27
7.3. Похибка визначення витрати суміші	27
Список рекомендованої літератури	28
Додатки	30

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Для проведення лабораторних робіт з отримання синтез-газу в лабораторії кафедри ДВЗ встановлено стенд ТХР-2.0.

Мета лабораторних досліджень на вказаному стенді наступна:

- отримання практичних навичків з отримання альтернативного виду палива для ДВЗ із відновлюваного джерела сировини;
- практичне ознайомлення з процесом зняття та обробки характеристик конверсії біоетанолу в синтез-газ та зняття характеристик теплових втрат реактора хімічної конверсії;
- зіставлення теоретичних знань студентів з результатами власних експериментальних досліджень.

Проведення випробувань на стенді в основному полягає у визначенні основних параметрів та побудові отриманих залежностей, кожна з яких описана у відповідних розділах методичних вказівок.

1.1. Техніка безпеки

Експериментальний стенд ТХР-2.0 є натурним об'єктом та призначений для отримання синтез-газу шляхом парової конверсії біоетанолу.

Підведення теплоти здійснюється за допомогою прямого пропускання електричного струму через реактор, при цьому температура всередині реактора може досягати 800 °С, тому існує велика небезпека ураження струмом та отримання опіків при неправильній експлуатації реактора.

Проведення випробувань без увімкненої системи примусової вентиляції у приміщенні суворо забороняється. Відсутність вентиляції може призвести до накопичення синтез-газу в приміщенні. Великі концентрації у приміщенні можуть призвести до отруєння та вибуху суміші синтез-газу з повітрям.

Грубе порушення умов експлуатації стенда призводить до серйозних наслідків. Так, робота стенда без охолодження продуктів конверсії може призвести до перегріву та руйнування конденсатора й вимірювального обладнання. Тому до лабораторних робіт допускаються особи, що пройшли відповідну теоретичну підготовку, інструктаж з техніки безпеки при роботі в лабораторії, а також вивчили конструкцію, принцип дії і правила обслуговування лабораторної установки.

У разі виявлення будь-яких несправностей експериментальної установки необхідно або не приступати до виконання роботи, або її вимкнути і повідомити про це керівників.

Робота на стенді без присутності навчального майстра або викладача суворо забороняється. Під час виконання лабораторних робіт студенти не повинні виконувати дії, не передбачені завданням і не узгоджені з викладачем або навчальним майстром.

1.2. Порядок підготовки до робіт

Перш за все необхідно вивчити будову досліджуваного стенда. При виконанні робіт бригадним методом кожен член бригади веде робочий звіт, в який при підготовці роботи заносяться наступні дані:

- назва роботи та її мета;
- схема стенда з докладним підрисуночним написом;
- принциповий вигляд кривих, які будуть побудовані за експериментальними даними;
- послідовність виконання роботи на стенді;
- формули для виконання обчислень;
- таблиці вимірювань і обробки результатів.

1.3. Звітність із лабораторних робіт

Кожен член бригади звітує про виконану роботу індивідуально. Визначення основних параметрів отримання альтернативного палива слід виконувати відповідно до рекомендацій розділу 5 та 6. Похибки результатів необхідно обчислювати відповідно до загальних умов при експериментальних випробуваннях, використовуючи рекомендації розділу 7. Результати вимірювань і результати їх обробки треба заносити в таблиці, форми яких наведені в розділах з описами лабораторних робіт.

Звіт повинен містити наступні елементи:

- числовий приклад обробки результатів для одного з режимів, вказаного викладачем, із записом алгебраїчних формул, короткими коментарями, підстановкою числових значень і одиниць вимірювань (для кінцевих результатів);
- зведену таблицю результатів;
- графіки шуканих залежностей (на форматі А4), що виконуються вручну на міліметровому або звичайному папері у вигляді комп'ютерної роздруківки за дозволом викладача.

1.4. Загальні вказівки до виконання графіків

Графіки будуються вручну на міліметровому папері або звичайному аркуші А4, а також можуть виконуватися у вигляді роздруківок з комп'ютера (за рішенням викладача).

При побудові графічних залежностей необхідно вибирати співвідношення масштабів осей таким чином, щоб картинка графіка наближалася до квадрата або прямокутника зі співвідношенням сторін не менше 1 : 3.

Абсолютний масштаб кожної шкали вибирається за схемою, наведеною нижче.

Кожне ділення шкали може відповідати або 1, або 2, або 2,5, або 5 одиницям вимірювання параметра даної шкали. Можливо також збільшення названих цифр у 10, 100, 1000 разів. Розмірність масштабу має вигляд дробу, в чисельнику якого одиниця вимірювання параметра шкали, а в знаменнику – одиниця вимірювання довжини осі. Розглянуте значення параметра, поділене на обраний масштаб, дає довжину відрізка на шкалі при визначенні координати точки. Ціна розподілу повинна бути в 5...10 разів більша від абсолютної похибки вимірювання параметра осі.

Осі повинні мати рівномірну розбивку шкал, а площа графіка розкреслена прямокутниками через розбивку цих шкал. Розбивка виконується через 1; 2; 2,5; 5 поділок шкал або через числа поділок, кратних зазначеним у 10*n* раз. Відповідно цифрові підписи на шкалах ідуть тільки по лініях розбивки у вигляді ряду цілих чисел (наприклад, у вигляді ряду 1, 2, 3, 4, 5 і т. д. або 2, 4, 6, 8, 10 і т. д., або 5, 10, 15, 20, 25 ...). Нулі і коми краще не використовувати, рекомендується їх враховувати загальним множителем поряд з позначенням шкали.

На підготовленій шахматці наносяться експериментальні точки. Точки, що належать до однієї кривої, відмічаються однаковими геометричними значками: кружками, квадратами, ромбами.

Криві залежностей проводяться через побудовані масиви точок з усередненням положення кривої. Остаточне положення кривих формується за допомогою лекала за попередньо побудованими від руки тонкими кривими.

2. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На сьогодні одним з перспективних способів використання біоетанолу в ДВЗ, який дозволяє не лише поліпшити паливно-економічні й екологічні характеристики, але і кінетичні показники процесу згоряння, є термохімічна конверсія.

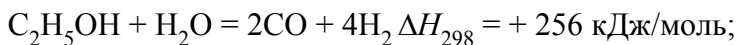
Суть способу полягає в наступному: під впливом теплоти, яка відбирається від ВГ двигуна в термохімічному реакторі, відбувається ендотермічна реакція хімічного перетворення біоетанолу, в результаті якої утворюється синтез-газ – суміш CO і H_2 . Хімічна енергія отриманого синтез-газу перевищує енергію використаного біоетанолу на величину, що дорівнює кількості утилізованої теплоти ВГ, яка разом з отриманим паливом вводиться в двигун для повторної участі в організації робочого циклу. В даному випадку термохімічний реактор виконує функцію пристрою утилізації.

Первинна оцінка ефективності термохімічної конверсії біоетанолу може бути встановлена при порівнянні теплотворної здатності рідкого біоетанолу і газоподібних продуктів його конверсії. Так, при згорянні 1 кг рідкого біоетанолу виділяється 26,78 МДж теплової енергії, а продукти конверсії тієї ж маси біоетанолу виділяють 34,87 МДж, тобто на 23,2 % більше. Збільшення теплотворної здатності синтез-газу відносно вихідного біоетанолу пояснюється тим, що в систему

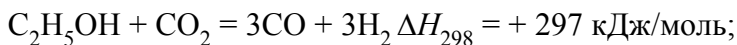
було введено відповідну додаткову кількість енергії (теплота реакції конверсії), що не суперечить положенням термодинаміки.

Одними з найважливіших параметрів, які характеризують процес хімічного перетворення вихідного палива, є ступінь конверсії (кількість перетвореного біоетанолу), а також температура процесу перетворення, тиск у реакторі, співвідношення вихідних компонентів реакції. У залежності від зазначених чинників у реакторі можуть відбуватися наступні реакції:

– парова конверсія (паровий риформінг)



– вуглекислотна конверсія (сухий риформінг)



– розкладання



У лабораторії перспективних енергетичних технологій НУК імені адмірала Макарова розроблено експериментальний стенд з отримання синтез-газу. Стенд дозволяє досліджувати процес конверсії біоетанолу в синтез-газ та знімати характеристики термохімічного реактора конверсії. На рис. 1 подана загальна схема установки.

Експериментальна установка (рис. 1) досить добре пристосована для проведення лабораторних робіт студентів при вивченні дисциплін "Палива, мастила та охолоджуючі рідини" та "Застосування альтернативних палив у ДВЗ".

Установка ТХР-2.0 обладнана регулюючими органами з дистанційним керуванням, штатними вимірювальними приладами, контрольними вимірювальними приладами і підсистемою первинних датчиків для забезпечення автоматизації проведення лабораторних робіт.

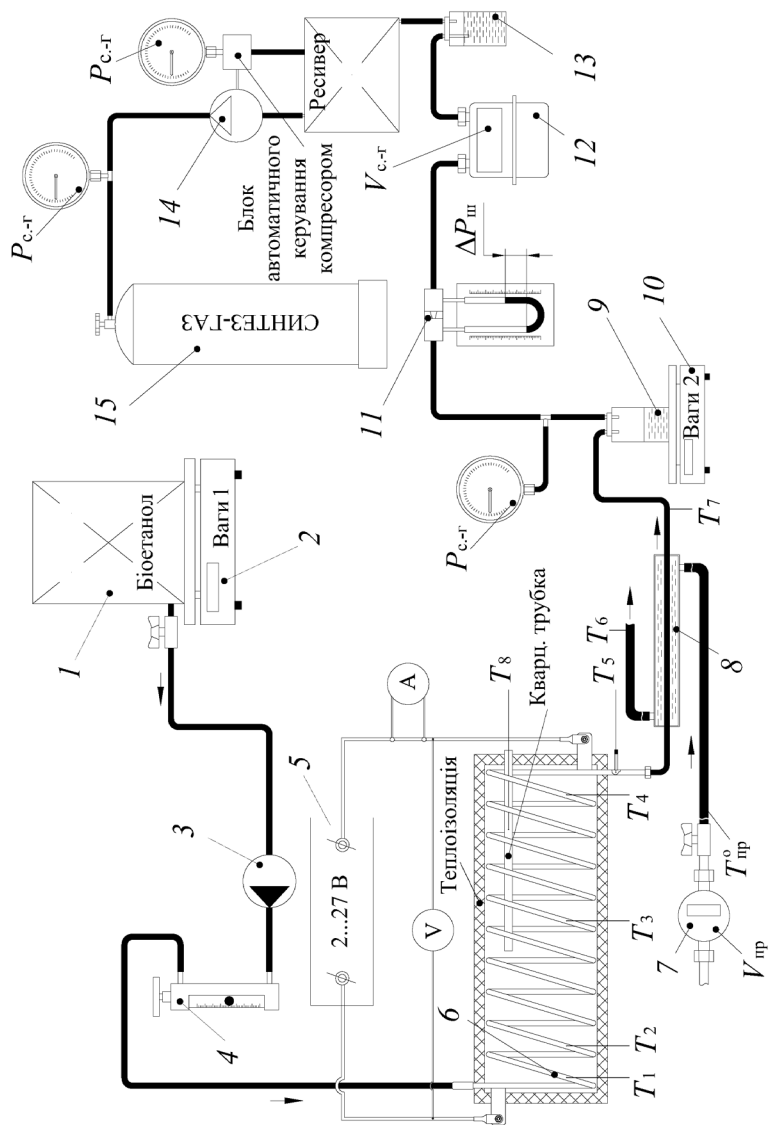


Рис. 1. Схема експериментальної установки для отримання синтез-газу

Стенд складається з наступних підсистем:

- подачі біоетанолу в термохімічний реактор (ТХР) 6 та пристроїв підведення енергії до нього (підведення тепла відбувається шляхом пропускання через реактор постійного струму від джерела живлення 5 напругою 24...31 В);
- охолодження та конденсації продуктів конверсії;
- закачування синтез-газу в балони;
- вимірювань, яка дозволяє вимірювати витрати, тиск, густину і температури всіх теплоносіїв, а також електричне навантаження на термохімічному реакторі.

Подача біоетанолу в ТХР 6 здійснюється за допомогою електричного насоса 3. Швидкість перебігу реакції здійснюється шляхом встановлення необхідного значення витрати біоетанолу на ротаметрі 4. Охолодження продуктів конверсії та очищення від залишків води і спирту, що не прореагував, забезпечується за допомогою теплообмінника типу труба в трубі 8 ($L = 5$ м, $d_{\text{вн}} = 7,8$ мм, матеріал – сталь 12Х18Н10Т), який охолоджується проточною водою. Витрата води фіксується за допомогою водяного лічильника 7 (Ду 15 VALTEC). Вода та елементи, що не прореагували, збираються в реторті 9. Кількість біоетанолу, що перетворилася, визначається шляхом зважування ємності з біоетанолом 1 на початку та в кінці експерименту за допомогою електронних цифрових ваг 2 (ВТА-60/6-7-А). Кількість сконденсованої суміші після охолодження в конденсаторі також визначається шляхом зважування за допомогою електронних цифрових ваг 10 (JKH-1000). Перепад тиску синтез-газу визначається за допомогою витратомірної шайби 11. Об'єм отриманого синтез-газу фіксується за допомогою газового лічильника 12 (Gallus 2000). З метою запобігання загорянню перед ресивером із синтез-газом встановлено водяний затвор 13. Отриманий синтез-газ за допомогою компресора 14 (CAJ 4492 А) набивається в балон 15 ($V_6 = 50$ л), в якому він і зберігається. Складовими

отриманого синтез-газу є водень, метан та оксид вуглецю. У табл. 1 наведені основні моторні властивості синтез-газу та його компонентів.

Таблиця 1. Основні моторні властивості різних видів палива

Властивості	Водень		Оксид вуглецю		Синтез-газ (67 % H ₂ , 33 % CO)		Синтез-газ (43 % H ₂ , 34 % CO, 23 % CH ₄)	
Теплота згоряння, кДж/кг	120000		10096		24083		28790	
Кількість повітря для згоряння, кг/кг	34,20		2,46		6,52		8,27	
Кількість повітря для згоряння, м ³ /м ³	2,38		2,38		2,38		4,02	
Густина, кг/м ³	0,089		1,25		0,472		0,629	
Енергоємність заряду, кДж/м ³	Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.
	3190	4530	3733	5302	3368	4784	3425	4617

Примітка. Експериментальний стенд створено під керівництвом д-ра техн. наук, проф., зав. каф. ДВЗ Б. Г. Тимошевського та д-ра техн. наук, проф., зав. каф. теоретичної механіки М. Р. Ткача.

3. ЗАПУСК ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ УСТАНОВКИ

1. Проведіть зовнішній огляд установки і перевірте затягнення кріплень, з'єднання дротів з клемми на реакторі та вимірювальних пристроях.

2. Після тривалого невикористання стенда необхідно перевірити герметичність усіх гнучких з'єднань. Підтравлювання газу не припустиме.

3. Наповніть витратний бак сумішшю, попередньо вимірявши густину.

4. Увімкніть систему примусової вентиляції приміщення.

5. Увімкніть електронні прилади вимірювання температури та подачу охолоджуючої рідини до конденсатора.

6. Увімкніть насос подачі суміші до реактора та встановіть за допомогою ротаметра необхідну витрату.

7. При виході установки на заданий режим роботи слід увімкнути компресор для наповнення балонів синтез-газом.

8. Перехід з одного режиму на інший треба проводити за допомогою збільшення витрати суміші, використовуючи ротаметр.

Примітка. Не допускається підвищення температури у реакторі більше ніж 700 °С. При перевищенні заданої температури регулятор вимикає подачу напруги до клем реактора. При цьому категорично забороняється вимикання подачі охолоджуючої рідини до конденсатора.

4. ЗУПИНКА УСТАНОВКИ

1. Вимкніть подачу напруги на клеми реактора конверсії.
2. Вимкніть подачу суміші до реактора (слід знеструмити насос подачі та перекрыти ротаметр).
3. Від'єднайте від компресора подачу синтез-газу, попередньо перекривши балони з газом, а також вимкнувши сам компресор.
4. Синтез-газ, що виділяється при зупинці реактора, необхідно відвести у систему вентиляції.
5. Треба дочекатися, щоб уся суміш біоетанолу та води вийшла з реактора, і тільки тоді вимкніть подачу охолоджуючої рідини до конденсатора.
6. Від'єднайте від струму електронні прилади вимірювання.
7. Вимкніть систему примусової вентиляції приміщення.

Примітка. Вимкнення системи примусової вентиляції приміщення здійснюється при повному зникненні запаху синтез-газу в приміщенні, але не раніше ніж 10...15 хв після виконання пунктів 1–6.

5. Лабораторна робота № 1.
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ
ТЕРМОХІМІЧНОГО РЕАКТОРА КОНВЕРСІЇ

Мета роботи – практичне визначення характеристики теплових втрат термохімічного реактора конверсії.

5.1. Порядок проведення визначення теплових втрат

Залежність середніх теплових втрат від середньої температури стінки реактора визначається для обчислення теплового балансу всієї установки та визначення кількості переданої енергії в реакторі при конверсії біоетанолу.

Викладачем задається крок змінення температури стінки реактора в інтервалі 200...650 °С. На основі отриманого кроку визначається режим при випробуванні, які заносяться до таблиці випробувань.

Теплові втрати визначаються шляхом встановлення рівноваги підведення енергії до реактора та відведення її у навколишнє середовище при сталому значенні температури реактора.

Для визначення теплових втрат необхідно: увімкнути джерело живлення 5 (див. рис. 1) без подачі суміші до реактора; за допомогою змінного опору слід установити необхідне значення струму на клеммах реактора; увімкнути живлення

електронних приладів вимірювання температури поверхні реактора. При установленому режимі (стабілізація температур у реакторі) заміряють усі доступні параметри згідно з протоколом випробувань.

Заміри виконуються всіма студентами одночасно за командою бригадира. Зняті показання приладів записуються кожним спостерігачем у свій окремий протокол, а по закінченні вимірювання результати повідомляються студенту, який заповнює загальний протокол. Після внесення всіх параметрів у загальний протокол бригадир дає сигнал про повторний замір на тому ж режимі. Два заміри на одному режимі здійснюються з метою виключення випадкових похибок та підвищення точності результатів. По закінченні контрольного заміру змінюється значення опору струму та установка переводиться на наступний режим роботи. У випадку, якщо у другому замірі результати суттєво відрізняються від першого, треба провести третій замір параметрів.

5.2. Визначення основних параметрів та побудова залежностей

1. Потужність на клеммах реактора

$$P_p = U_p I_p \text{ Вт,}$$

де U_p – напруга на клеммах, В; I_p – струм, А.

2. Середнє арифметичне значення температури стінки реактора

$$T_{\text{ср}}^{\text{арифм}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \text{ К,}$$

де T_i – значення температури стінки по довжині реактора, К;
 n – кількість точок заміру поверхні реактора.

3. Середнє геометричне значення температури стінки реактора

$$T_{\text{ср}}^{\text{геом}} = \sqrt[n]{T_1 T_2 \dots T_n} \text{ К.}$$

4. Середнє інтегральне значення температури стінки реактора.

Значення середньоінтегральної температури стінки реактора може бути визначено двома способами в залежності від завдання, виданого викладачем.

Перший спосіб полягає у визначенні середньоінтегральної температури графічним шляхом: визначення площі криволінійної фігури для кожного масиву значень температури стінки реактора за допомогою побудови кривої на міліметровому папері. Потім визначається середнє значення температури.

Другий спосіб полягає у визначенні середньоінтегральної температури розрахунковим способом. Для цього визначається рівняння кривої за допомогою лінії тренду (опції Microsoft Excel) та розраховується її інтеграл.

Приклад розрахунку та побудови залежності потужності теплових втрат реактора від середньоінтегральної температури стінки реактора наведено у табл. 2 та рис. 2 відповідно.

Таблиця 2. Результати замірів та розрахунків значень теплових втрат реактора

№ з.п.	Потужність реактора			Розподіл температури стінки по довжині реактора				Середнє значення температури стінки реактора			
	U_p	I_p	P	L_1	L_2	L_3	L_4	Середнє арифметичне	Середнє геометричне	Середнє інтегральне	
				М							
				0,4	0,8	2,8	6,0				
				T_1	T_2	T_3	T_4				
	В	А	Вт	°C				°C			
1	5,2	14,7	76,3	179,3	209,0	227,3	189,8	201,4	200,5	215,6	
2	6,4	17,3	110,9	224,3	259,5	286,6	234,8	251,3	250,2	268,7	
3	8,4	21,3	179,2	361,2	424,9	479,6	378,1	411,0	408,4	445,1	
4	10,7	26,7	285,3	431,1	506,1	569,2	449,4	489,0	486,0	527,6	

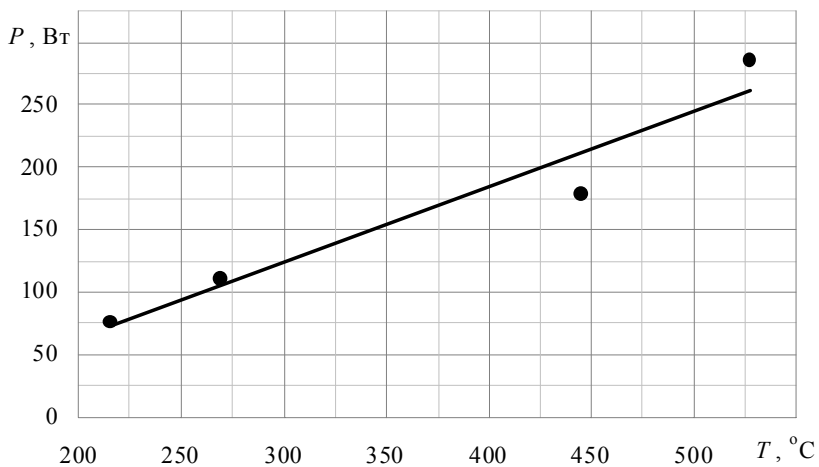


Рис. 2. Залежність потужності теплових втрат реактора від середньоінтегральної температури стінки реактора

6. Лабораторна робота № 2.
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОХІМІЧНОГО
РЕАКТОРА КОНВЕРСІЇ БІОЕТАНОЛУ
ПРИ ОТРИМАННІ СИНТЕЗ-ГАЗУ

Мета роботи – отримання практичних навичок з отримання синтез-газу з біоетанолу; визначення характеристик термохімічного реактора конверсії.

6.1. Порядок проведення

Під час виконання лабораторної роботи вирішуються наступні завдання:

- визначення характеру змінення температури стінки реактора по довжині;
- визначення властивостей синтез-газу при різних складі та витраті суміші, а також потужності реактора;
- визначення енергетичних показників реактора конверсії біоетанолу.

Викладачем задається відсоткове співвідношення біоетанолу і води та діапазон змінення витрати суміші для різних режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно: увімкнути живлення реактора 5 (див. рис. 1) та насоса 3; установити

задану викладачем витрату суміші за допомогою ротаметра 4; увімкнути подачу охолоджуючої рідини конденсатора 8. При установленому режимі (стабілізація температур у реакторі 6) заміряють усі доступні параметри згідно з протоколом випробувань (Дод. А).

Заміри виконуються всіма студентами одночасно за командою бригадира. Зняті показання приладів записуються кожним спостерігачем у свій окремий протокол, а по закінченні вимірювання результати повідомляються студенту, який заповнює загальний протокол. Після внесення всіх параметрів у загальний протокол бригадир дає сигнал про повторний замір на тому ж режимі.

Два заміри на одному режимі здійснюються з метою виключення випадкових похибок та підвищення точності результатів. У випадку, якщо у другому замірі результати суттєво відрізняються від першого, слід провести третій замір параметрів.

По закінченні контрольного заміру змінюється значення витрати суміші за допомогою ротаметра 4 та установка переводиться на наступний режим роботи.

6.2. Визначення основних параметрів та побудова залежностей

1. Визначення витрат теплоносіїв

1.1. Витрата суміші через реактор

$$G_{\text{сум}}^{\text{р}} = \frac{m_{\text{сум}}^1 - m_{\text{сум}}^2}{t_{\text{сум}}} \text{ кг/с,}$$

де $m_{\text{сум}}^1$ – маса суміші на початку заміру; $m_{\text{сум}}^2$ – маса суміші в кінці заміру; $t_{\text{сум}}$ – час заміру.

1.2. Витрата сконденсованої суміші

$$G_{\text{сум}}^{\text{ск}} = \frac{m_{\text{сум}}^{\text{ск}} - m_{\text{р}}}{t_{\text{ск}}} \text{ кг/с},$$

де $m_{\text{сум}}^{\text{ск}}$ – маса сконденсованої суміші у реторті; $m_{\text{р}}$ – маса реторти; $t_{\text{ск}}$ – час заміру.

1.3. Витрата синтез-газу

$$Q_{\text{с.-г}} = \frac{V_{\text{с.-г}}^2 - V_{\text{с.-г}}^1}{t_{\text{с.-г}}} \text{ м}^3/\text{с},$$

де $V_{\text{с.-г}}^1$ – об'єм синтез-газу на початку заміру; $V_{\text{с.-г}}^2$ – об'єм синтез-газу в кінці заміру; $t_{\text{с.-г}}$ – час заміру.

1.4. Витрата охолоджуючої рідини

$$Q_{\text{о.р}} = \frac{V_{\text{о.р}}^2 - V_{\text{о.р}}^1}{t_{\text{о.р}}} \text{ м}^3/\text{с},$$

де $V_{\text{о.р}}^1$ – об'єм охолоджуючої рідини на початку заміру; $V_{\text{о.р}}^2$ – об'єм охолоджуючої рідини в кінці заміру; $t_{\text{о.р}}$ – час заміру.

2. Визначення ступеня конверсії

2.1. Ступінь конверсії біоетанолу.

$$\xi_6 = \frac{G_6^{\text{р}} - G_6^{\text{ск}}}{G_6^{\text{р}}} \times 100 \%,$$

де $G_6^{\text{р}}$ – витрата біоетанолу через реактор; $G_6^{\text{ск}}$ – витрата сконденсованого біоетанолу, що розраховується таким чином:

$$G_6^{\text{р}} = \%_6^{\text{р}} \times G_{\text{сум}}^{\text{р}} \text{ кг/с},$$

де $\%_6^{\text{р}}$ – масова частка біоетанолу в суміші;

$$G_6^{\text{ск}} = \%_6^{\text{ск}} \times G_{\text{сум}}^{\text{ск}} \text{ кг/с},$$

де $\%_6^{\text{ск}}$ – масова частка біоетанолу в сконденсованій суміші.

2.2. Ступінь конверсії води

$$\xi_B = \frac{G_B^p - G_B^{ck}}{G_B^p} \times 100 \%,$$

де G_B^p – витрата води через реактор; G_B^{ck} – витрата сконденсованої води;

$$G_B^p = \%_B^p G_{\text{сум}}^p \text{ кг/с},$$

де $\%_B^p$ – масова частка води у суміші;

$$G_B^{ck} = \%_B^{ck} G_{\text{сум}}^{ck} \text{ кг/с},$$

де $\%_B^{ck}$ – масова частка води у сконденсованій суміші.

2.3. Ступінь конверсії суміші

$$\xi_{\text{сум}} = \frac{G_{\text{сум}}^p - G_{\text{сум}}^{ck}}{G_{\text{сум}}^p} \times 100 \%.$$

3. Визначення теплового балансу процесу отримання синтез-газу

3.1. Потужність, яка підводиться від джерела живлення

$$Q_{\text{д.ж}} = U_p I_p \text{ Вт.}$$

3.2. Потужність теплових втрат

$$Q_{\text{т.в}} = f(T_{\text{ср}}) \text{ Вт},$$

визначається в залежності від середньої температури стінок реактора $T_{\text{ср}}$. Методика розрахунку викладена у розділі 5.2.

3.3. Потужність, яка підводиться до суміші

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{д.ж}} - Q_{\text{т.в}} \text{ Вт.}$$

3.4. Потужність розігріву суміші до температури реакції

$$Q_{\text{сум}}^{\text{роз}} = (Q_6^{\text{наг}} + Q_B^{\text{наг}}) + (Q_6^{\text{вип}} + Q_B^{\text{вип}}) + (Q_6^{\text{пер}} + Q_B^{\text{пер}}) \text{ Вт},$$

де $Q_6^{\text{наг}}$, $Q_{\text{в}}^{\text{наг}}$ – відповідно потужність нагріву біоетанолу та води до температури кипіння; $Q_6^{\text{вип}}$, $Q_{\text{в}}^{\text{вип}}$ – потужність випаровування біоетанолу та води відповідно; $Q_6^{\text{пер}}$, $Q_{\text{в}}^{\text{пер}}$ – потужність перегріву біоетанолу та води до температури реакції;

$$Q_6^{\text{наг}} = G_6^{\text{р}} [h_6^{\text{наг}} (T_6^{\text{к}}) - h_6^{\text{наг}} (T_6^0)] \text{ Вт},$$

де $h_6^{\text{наг}} = 1,496(T_6^i)^{1,124}$ – питома ентальпія нагріву біоетанолу, кДж/кг; $T_6^{\text{к}} = 78$ – температура кипіння біоетанолу, °С; $T_6^0 = T_{\text{сум}}^0$ – температура біоетанолу на вході в реактор, °С;

$$Q_{\text{в}}^{\text{наг}} = G_{\text{в}}^{\text{р}} [h_{\text{в}}^{\text{наг}} (T_{\text{в}}^{\text{к}}) - h_{\text{в}}^{\text{наг}} (T_{\text{в}}^0)] \text{ Вт},$$

де $h_{\text{в}}^{\text{наг}} = 4,177T_{\text{в}}^i + 0,514$ – питома ентальпія нагріву води, кДж/кг; $T_{\text{в}}^{\text{к}} = 100$ – температура кипіння води, °С; $T_{\text{в}}^0 = T_{\text{сум}}^0$ – температура води на вході в реактор, °С;

$$Q_6^{\text{вип}} = G_6^{\text{р}} r_6^{\text{вип}} \text{ Вт},$$

де $r_6^{\text{вип}} = 991,8$ – питома теплота випаровування біоетанолу, кДж/кг;

$$Q_{\text{в}}^{\text{вип}} = G_{\text{в}}^{\text{р}} r_{\text{в}}^{\text{вип}} \text{ Вт},$$

де $r_{\text{в}}^{\text{вип}} = 2259$ – питома теплота випаровування води, кДж/кг;

$$Q_6^{\text{пер}} = G_6^{\text{р}} [h_6^{\text{пер}} (T_{\text{р}}) - h_6^{\text{пер}} (T_6^{\text{к}})] \text{ Вт},$$

де $h_6^{\text{пер}} = 0,001(T_6^i)^2 + 1,555T_6^i + 1041$ – питома ентальпія перегріву біоетанолу, кДж/кг; $T_{\text{р}} = T_5$ – температура реакції, °С;

$$Q_{\text{в}}^{\text{пер}} = G_{\text{в}}^{\text{р}} [h_{\text{в}}^{\text{пер}} (T_{\text{р}}) - h_{\text{в}}^{\text{пер}} (T_{\text{в}}^{\text{к}})] \text{ Вт},$$

де $h_{\text{в}}^{\text{пер}} = 1,996T_{\text{в}}^i + 2476$ – питома ентальпія перегріву води.

3.5. Потужність хімічної реакції

$$Q_{\text{х.р}} = Q_{\text{сум}} - Q_{\text{наг}}^{\text{р}} \text{ Вт}.$$

3.6. Потужність охолодження суміші після реактора

$$Q_{\text{ох}} = G_{\text{ох}} C_{pw} (T_w^2 - T_w^1) \text{ Вт},$$

де T_w^1, T_w^2 – температура охолоджуючої рідини на вході й виході з теплообмінника (ТО); $C_{pw} = 4,187 \text{ кДж/(кгК)}$ – питома теплоємність води.

За наведеними вище формулами визначаються необхідні параметри та показники, після чого вони заносяться до таблиці розрахунків (Дод. Б).

За даними таблиці розрахунків будуються графіки залежностей параметрів реактора та процесу конверсії біоетанолу.

7. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ

7.1. Похибка визначення витрати за допомогою витратомірної шайби

Як відомо, витрату газу через звужуючий пристрій обчислюють за формулою

$$G = \alpha' \sqrt{\Delta h \rho_{\Pi}} \text{ кг/с},$$

тоді відносна похибка складає:

$$\delta G = \delta \alpha' + 0,5(\delta \rho_{\Pi} + \delta h).$$

Похибка визначення α' залежить від значної кількості чинників. Основні з яких:

- точність визначення геометричних розмірів отвору сопла;
- чистота і точність його виготовлення;
- зміна його розмірів зі зміною температури сопла в процесі проведення випробувань і точність урахування впливу цього чинника.

Урахування всіх цих чинників вельми складне, а витрати часу на їх визначення в даному випадку вищі за межі, виправдані метою роботи.

У зв'язку з цим рекомендується обрати $\delta\alpha' = 1\%$, що приблизно відповідає параметрам лабораторних установок.

Похибка визначення густини синтез-газу обчислюється за формулою

$$\delta\rho_{\text{п}} = \frac{K_{\text{м}}P_{\text{max}}}{100P_{\text{с.-г}}} + \frac{\Delta T_5}{T_5},$$

де $K_{\text{м}}$ – клас точності манометра; $P_{\text{с.-г}}$ – показання манометра; P_{max} – граничне значення шкали; ΔT_5 – абсолютна похибка визначення температури синтез-газу перед витратомірною шайбою; T_5 – абсолютна температура синтез-газу перед витратомірною шайбою.

Відповідно до навчальних цілей даної роботи похибку ΔT_5 пропонується прийняти такою, що орієнтовно дорівнює 1 К.

Похибка визначення перепаду тиску на витратомірній шайбі визначається за формулою:

$$\delta h = \frac{\Delta h'}{\Delta h},$$

де $\Delta h'$ – абсолютна похибка вимірювання перепаду на водяному п'єзометрі, яким вимірюють розрідження; Δh – вимірний перепад між менісками водяного стовпа в п'єзометрі.

Значення $\Delta h'$ може оцінюватися як можлива похибка перепаду між менісками. При акуратному вимірюванні перепаду металевою лінійкою можна взяти $\Delta h' = 1$ мм.

Таким чином, похибка визначення витрати повинна обчислюватися за наступною формулою:

$$\delta G = \delta\alpha' + 0,5 \left(\frac{K_{\text{м}}P_{\text{max}}}{100P_{\text{с.-г}}} + \frac{\Delta T_5}{T_5} + \frac{\Delta h'}{\Delta h} \right).$$

7.2. Похибка визначення температури

Температури реактора, суміші біоетанолу, синтез-газу вимірюються за допомогою цифрового приладу 2ТРМ1, використовуючи ТХК та ТХА. Замір температур проводився при безпосередньому встановленні чутливого елемента термопар у потік газу та до поверхні реактора. Клас точності приладу 2ТРМ1 – 0,25.

Унаслідок проведення індивідуального тарування термопар було забезпечено сумарну абсолютну похибку вимірювання температури у межах $\pm 0,1$ К у діапазоні 273...973 К.

7.3. Похибка визначення витрати суміші

Витрата суміші біоетанолу та води визначається за допомогою електронних ваг з точністю вимірювання 1 г. Час визначається за допомогою таймеру комп'ютера з точністю 0,01 с. Тоді похибка визначення витрати суміші може бути визначена за формулою

$$\delta G_{\text{сум}} = \delta M_{\text{сум}} + \delta \tau,$$

де $\delta M_{\text{п}}$ – похибка визначення маси палива; $\delta \tau$ – похибка визначення часу.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Данилов, А. М.** Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4–11.
2. **Карпов, С. А.** Автомобильные топлива с биоэтано-лом [Текст] / С. А. Карпов, В. М. Капустин, А. К. Старков. – М. : КолосС, 2007. – 216 с.
3. **Носач, В. Г.** Повышение эффективности использо-вания биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации [Текст] / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 2. – С. 57–63.
4. **Носач, В. Г.** Повышение эффективности использо-вания природного газа в теплоэнергетике с помощью термохи-мической регенерации [Текст] / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 3 – С. 42–50.
5. Работа дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, Н. А. Ива-щенко. – М. : Легион–Автодата, 2008. – 464 с.
6. Справочник по химии [Текст] / Л. М. Блинов, И. Л. Пер-филова, Л. В. Юмашева, Р. Г. Чувиляев. – М. : Проспект, 2011. – 160 с.

7. **Тимошевский, Б. Г.** Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив, применяемых в ДВС [Электронный ресурс] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Электронные издания "Вісник НУК". – 2011. – № 3. – С. 36–42.

8. **Третьяков, В. Ф.** Биоэтанол – стратегия развития топливного и нефтехимического комплекса [Текст] / В. Ф. Третьяков // Химическая техника. – 2008. – № 1. – С. 8–12.

9. Cheekatamarla, P. K. Reforming catalysts for hydrogen generation in fuel cell applications [Text] / P. K. Cheekatamarla, C. M. Finnerty // Journal of Power Sources. – 2006. – P. 490–499.

10. Ethanol steam reforming in a microchannel reactor [Text] / Y. Men, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel and H. Lowe // Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection. – 2007. – Vol. 85(B5). – P. 413–418.

11. Methane steam reforming for hydrogen production using low water-ratios without carbon formation over ceria coated Ni catalysts [Text] / J. Xu [et al.] // Applied Catalysis A. – 2008. – P. 119–127.

12. Production of H_2 for fuel cell applications: methanol steam reforming with sufficiently thorough cleaning of H_2 from CO impurity [Text] / A. Ya. Rozovskii [et al.] // Topics in Catalysis. – 2007. – Vol. 42–43. – P. 437–441.

13. Reactivity of steam in exhaust gas catalysis III. Steam and oxygen/steam conversions of propane on a Pd/Al_2O_3 catalyst [Text] / T. Mailliet [et al.] // Applied Catalysis B. – 1996. – P. 251–266.

**ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ
ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
"Визначення параметрів термохімічного реактора
конверсії біоетанолу при отриманні синтез-газу"**

№ з.п.	Параметр	Режим роботи реактора				
		1	2	3	4	5
1	Температура суміші на вході в реактор $T_{\text{сум}}^0$, °C					
2	Витрата суміші через реактор: – маса суміші на початку заміру $m_{\text{сум}}^1$, кг – маса суміші в кінці заміру $m_{\text{сум}}^2$, кг – час заміру $t_{\text{сум}}$, с					
3	Витрата сконденсованої суміші: – маса сконденсованої суміші у реторті $m_{\text{сум}}^{\text{ек}}$, кг – маса реторти m_p , кг – час заміру $t_{\text{ек}}$, с					
4	Витрата синтез-газу: – об'єм синтез-газу на початку заміру $V_{\text{с-г}}^1$, м ³ – об'єм синтез-газу в кінці заміру $V_{\text{с-г}}^2$, м ³ – час заміру $t_{\text{с-г}}$, с					
5	Витрата охолоджуючої рідини: – об'єм охолоджуючої рідини на початку заміру $V_{\text{о.р}}^1$, м ³ – об'єм охолоджуючої рідини в кінці заміру $V_{\text{о.р}}^2$, м ³ – час заміру $t_{\text{о.р}}$, с					
6	Температура сконденсованої суміші $T_{\text{ек}}$, °C					
7	Густина сконденсованої суміші $\rho_{\text{ек}}$, кг/м ³					
8	Масова частка біоетанолу в сконденсованій суміші $\%_{\text{б}}^{\text{ек}}$					
9	Масова частка води у сконденсованій суміші $\%_{\text{в}}^{\text{ек}}$					
10	Напруга на клемі U_p , В					
11	Струм I , А					
12	Температура реакції T_p , °C					

Продовж. додатка А

№ з.п.	Параметр	Режим роботи реактора				
		1	2	3	4	5
13	Температура охолоджуючої рідини на вході в ТО T_w^1 , °C					
14	Температура охолоджуючої рідини на виході з ТО T_w^2 , °C					
15	Температура стінок реактора:					
	T_1 , °C					
	T_2 , °C					
	T_3 , °C					
	T_4 , °C					

Сталі величини:

Температура навколишнього
середовища $t_o = \underline{\hspace{1cm}}$ °C

Масова частка біоетанолу
суміші $\%_b^p = \underline{\hspace{1cm}}$

Тиск навколишнього
середовища $B = \underline{\hspace{1cm}}$ мм рт. ст.

Масова частка води у
суміші $\%_b^p = \underline{\hspace{1cm}}$

Виконав студент _____ гр. _____

Перевірив викладач _____

Дата _____ р.

ПРОТОКОЛ РОЗРАХУНКІВ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
"Визначення параметрів термодімічного реактора конверсії біоетанолу
при отриманні синтез-газу"

№ з.п.	Параметр	Розрахункова формула	Режим роботи реактора				
			1	2	3	4	5
1	Витрата суміші через реактор	$G_{\text{сум}}^p = \frac{m_{\text{сум}}^1 - m_{\text{сум}}^2}{t_{\text{сум}}}$					
2	Витрата сконденсованої суміші	$G_{\text{сум}}^{\text{ск}} = \frac{m_{\text{сум}}^{\text{ск}} - m_p}{t_{\text{ск}}}$					
3	Витрата синтез-газу	$Q_{\text{с-г}} = \frac{V_{\text{с-г}}^2 - V_{\text{с-г}}^1}{t_{\text{с-г}}}$					
4	Витрата охолоджуючої рідини	$Q_{\text{о.р}} = \frac{V_{\text{о.р}}^2 - V_{\text{о.р}}^1}{t_{\text{о.р}}}$					
5	Ступінь конверсії біоетанолу	$\xi_6 = \frac{G_6^p - G_6^{\text{ск}}}{G_6^p} \times 100 \%$					
6	Ступінь конверсії води	$\xi_B = \frac{G_B^p - G_B^{\text{ск}}}{G_B^p} \times 100 \%$					
7	Ступінь конверсії суміші	$\xi_{\text{сум}} = \frac{G_{\text{сум}}^p - G_{\text{сум}}^{\text{ск}}}{G_{\text{сум}}^p} \times 100 \%$					

8	Потужність, яка підводиться від джерела живлення	$Q_{\text{д.ж}} = U I_{\text{р}}$					
9	Потужність теплових втрат	$Q_{\text{т.в}} = f(T_{\text{ср}})$					
10	Потужність, яка підводиться до суміші	$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{д.ж}} - Q_{\text{т.в}}$					
11	Потужність нагріву біоетанолу до температури кипіння	$Q_{\text{наг}}^{\text{р}} = G_{\text{б}}^{\text{р}} [h_{\text{б}}^{\text{наг}}(T_{\text{б}}^{\text{к}}) - h_{\text{б}}^{\text{наг}}(T_{\text{б}}^0)]$					
12	Потужність нагріву води до температури кипіння	$Q_{\text{б}}^{\text{наг}} = G_{\text{б}}^{\text{р}} [h_{\text{б}}^{\text{наг}}(T_{\text{б}}^{\text{к}}) - h_{\text{б}}^{\text{наг}}(T_{\text{б}}^0)]$					
13	Потужність випаровування біоетанолу	$Q_{\text{б}}^{\text{вип}} = G_{\text{б}}^{\text{р}} r_{\text{б}}^{\text{вип}}$					
14	Потужність випаровування води	$Q_{\text{в}}^{\text{вип}} = G_{\text{в}}^{\text{р}} r_{\text{в}}^{\text{вип}}$					
15	Потужність перегріву біоетанолу	$Q_{\text{б}}^{\text{пер}} = G_{\text{б}}^{\text{р}} [h_{\text{б}}^{\text{пер}}(T_{\text{р}}) - h_{\text{б}}^{\text{пер}}(T_{\text{б}}^{\text{к}})]$					
16	Потужність перегріву води	$Q_{\text{в}}^{\text{пер}} = G_{\text{в}}^{\text{р}} [h_{\text{в}}^{\text{пер}}(T_{\text{р}}) - h_{\text{в}}^{\text{пер}}(T_{\text{б}}^{\text{к}})]$					
17	Потужність розігріву суміші до температури реакції	$Q_{\text{сум}}^{\text{роз}} = (Q_{\text{б}}^{\text{наг}} + Q_{\text{в}}^{\text{наг}}) + (Q_{\text{б}}^{\text{вип}} + Q_{\text{в}}^{\text{вип}}) + (Q_{\text{б}}^{\text{пер}} + Q_{\text{в}}^{\text{пер}})$					
18	Потужність хімічної реакції	$Q_{\text{х.р}} = Q_{\text{сум}} - Q_{\text{нагр}}^{\text{р}}$					
19	Потужність охолодження суміші після реактора	$Q_{\text{ох}} = G_{\text{ох}} C_{\text{рв}} (T_{\text{w}}^2 - T_{\text{w}}^1)$					